UNIVERSITÉ DE OUAGADOUGOU

UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE
EN SCIENCES EXACTES ET APPLIQUEES
(UFR-SEA)

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

LABORATOIRE DES MATERIAUX
ET ENVIRONNEMENT (LAME)

ANNEE UNIVERSITAIRE 2005-2006

BURKINA-FASO
UNITE-PROGRES-JUSTICE

MEMOIRE Présenté par :
Mr. KY Thierry S. Maurice

Pour obtenir le ***DEA en Physique Appliquée***
Option : ***Semi-conducteurs***

Thème : Système Photo-Voltaïque : Dimensionnement pour pompage d'eau, pour une irrigation goutte-à-goutte

Présenté et soutenu publiquement le : 17 février 2007

Sous la Direction du : Pr. François ZOUGMORE ; Maître de Conférence

Président du jury : Pr. Dieudonné J. BATHIEBO ; Maître de Conférence
Membres : Pr. Zacharie KOALAGA ; Maître de Conférence
Pr. François ZOUGMORE ; Maître de Conférence
Dr. Abdoulaye OUEDRAOGO ; Maître Assistant

Au Parent Cosmique,

Aux Vrais Parents du Ciel et de la Terre,

A toute ma Famille Spirituelle et Physique...

Remerciements

Je vous remercie, Monsieur François ZOUGMORE, Maître de Conférences à l'Unité de Formation et de Recherche en Sciences Exactes et Appliquées, Responsable du Troisième Cycle de Physique, pour m'avoir accepté dans votre laboratoire, pour la direction de ce travail et pour votre participation à ce jury.

Je vous remercie, Monsieur Dieudonné J. BATHIEBO, Maître de Conférences à l'Université de Ouagadougou, pour votre disponibilité et votre participation à ce Jury que vous avez bien voulu présider.

Je vous remercie, Monsieur Zacharie KOALAGA, Maître de Conférences à l'Université de Ouagadougou, pour vos travaux qui ont été une source d'inspiration pour ce Mémoire, et pour votre disponibilité et votre participation à ce jury.

Je vous remercie, Monsieur Abdoulaye OUEDRAOGO, Maître Assistant à l'Université de Ouagadougou, pour votre disponibilité et votre participation à ce jury.

Je témoigne ma reconnaissance à tous les enseignants de l'AEA.

Je vous remercie, Dr Idrissa F. BARRO, pour votre disponibilité et votre soutien à ce travail.

Je vous remercie, Dr Issa ZERBO, pour votre disponibilité et votre soutien à ce travail.

Je vous remercie, Monsieur Françis S. KAM, doctorant du LAME, pour votre contribution et votre soutien pour la conduite de ce travail.

Je vous remercie, chers aînés doctorants du LAME, en particulier Monsieur Bernard ZOUMA et Monsieur Martial ZOUNGRANA.

Je remercie le Comité Académique Pour la Recherche des Principes (WCARP Burkina), notamment sa Présidente Madame Mau Ngoma ILBOUDO, pour m'avoir inspiré à postuler pour ce DEA, et pour son soutien moral et matériel tout au long de ce travail.

Je remercie la société TECHNOVA et son Directeur Monsieur Christophe SANON, pour sa contribution substantielle aux frais de laboratoire, et pour avoir permis des recherches par le biais de son entreprise.

Je remercie tous mes Camarades chercheurs du LAME.

Plan de Travail

Nomenclature 5
Introduction 7
I- Schémas et description du principe 9
I-1 Définition générale du système de pompage d'eau 10
I-1-1 Les pompes centrifuges 11
I-1-2 Les pompes volumétriques 11
I-1-3 Les pompes de surface et les pompes immergées 12
I-2 Définition générale d'une irrigation « goutte à goutte » 12
I-3 Définition générale d'un générateur photovoltaïque 14
I-4 Présentation de la méthode de dimensionnement 15
II- Détermination des besoins en eau 16
II-1 Besoins en eau des plantes à irriguer 16
II-1-1 Méthodologie 16
II-1-2 Modes de calcul 16
II-1-3 Récapitulatif et Exemples 18
II-2 Etude du stockage de l'eau. 20
II-3 Dimensionnement de la capacité de stockage d'eau 21
III- Choix et dimensionnement de la moto-pompe 22
III-1 Choix de la moto-pompe 22
III-2 Dimensionnement de la moto-pompe 24
III-2-1 Dimensionnement par la méthode graphique 25
III-2-2 Dimensionnement par la méthode analytique 27
IV– Dimensionnement du champ Photovoltaïque 30
IV-1 Quelques mots sur l'onduleur 30
IV-2 Inclinaison des panneaux 30
IV-2-1 Position du soleil 30
IV-2-2 Orientation des panneaux par rapport au soleil 31
IV-3 Calcul de l'ensoleillement dans le plan du champ PV 33
IV-3-1 Angle d'incidence du rayonnement sur les panneaux 33
IV-3-2 Ensoleillement dans le plan du champ PV 34
IV-4 Modélisation du champ photovoltaïque 35
Conclusion et perspectives 36
Bibliographie 37

NOMENCLATURE

Id.	Signification	Unité
a (°)	Azimut	° (angle)
alb	Albédo	-
AH	Heure solaire	° (angle)
c	Facteur d'ajustement concernant l'effet des conditions climatiques jour et nuit.	-
C	fraction de sol couverte par la plante (variant de 0 à 1. 1 = couverture totale)	-
C_f	Coefficient de correction de l'inclinaison des panneaux	-
C_p	Chaleur spécifique à pression constante=1.013 10^{-3}	MJ/kg/°C,
e_a	Pression de vapeur actuelle de l'air	kPa
ea - ed	Déficit pression de vapeur	kPa
e_s	Pression de vapeur saturant	kPa
E	évaporation physique d'un grand réservoir	mm
E_a	pouvoir évaporant de l'air approché par la formule de Rohwer	mm
E_A	Energie Electrique Fournie par le système PV	J
E_{bac}	Evaporation du bac (évaporimètre)	mm
E_c	évaporation mesurée sur bac Colorado	mm
E_{hydr}	Energie Hydraulique	J
E_{pompe}	Energie de la Pompe	J
ET_0	Evapotranspiration de référence	mm/jour
ETP	Evapotranspiration Potentielle	mm/jour
f(u)	Fonction du vent	-
g	Constant de gravité	9,81 m/s^2
G	Flux de chaleur du sol	W/m^2
h	Hauteur	m
h (°)	Hauteur angulaire	° (angle)
H	ensoleillement global horizontal	J/m^2
Hb	ensoleillement direct	J/m^2
Hd	ensoleillement diffus	J/m^2
H_{max}	Ensoleillement maximum à midi solaire	J/m^2
Ht	Ensoleillement horaire	J/m^2
Ħt	Ensoleillement journalier	J/m^2
HMT	Hauteur manométrique totale	m
I = f(V)	l'Intensité I est une fonction de la Tension V	A
Ir	Besoin d'irrigation	-
IR	Irradiation	J/m^2
K_t	Indice de clarté mensuel	-
L	Lessivage	-
NOCT	Température nominale des cellules en opération	°C
P	Puissance	W
P	Pression atmosphérique	kPa
PV	Abréviation de « Photovoltaïque »	-
Q	Débit de la pompe	m^3/jour
R	Pluies tombées depuis la dernière irrigation	-
R_b	Rapport entre l'ensol. direct sur le champ et l'ensol. direct sur l'horizontale	-

Rn	Radiation nette en équivalent d'évaporation	mm/jour
s	Angle d'inclinaison réelle	° (angle)
s_M	Angle d'inclinaison optimale	° (angle)
T	Température moyenne à 2 m	°C
T_a	Température moyenne ambiante	°C
Tc	Température du champ photovoltaïque	°C
Tr	Température de référence de la cellule PV	°C
u	Vitesse du vent	m/s
U_2	vitesse du vent mesurée à 2 m	m/s
Vdc - Vac	Tension de courant continu - alternatif	V
W	Facteur de pondération lié à la température.	-
Wn	Besoin en eau effectif de la plante	m^3
Wp ou Wc	Puissance crête	W
Δ	Pente de la courbe de tension de vapeur	kPa/°C
Δt	Durée totale d'ensoleillement journalier	s
β	Angle d'incidence du rayonnement	° (angle)
βp	coefficient de température pour le rendement du module	-
βz	angle zénithal du soleil	° (angle)
δ	Déclinaison solaire	° (angle)
e	rapport poids moléculaire vapeur/air sec=0.622,	-
Φ	Latitude du site d'installation	° (angle)
ρ	Densité de l'eau	$1000kg/m^3$
γ	Constante psychrométrique	kPa/°C
η	Facteur qui tient compte des pertes de charge	-
η_A	Rendement total du système PV	-
η_m	Pertes de charge exprimées en mètre linéaire de hauteur	m
η_{moy}	Rendement moyen de la pompe	-
η_{ond}	Rendement Onduleur	-
η_p	Rendement du champ photovoltaïque	-
η_{pompe}	Rendement de la pompe	-
η_r	rendement du module à la température de référence T_r = 25°c	-
λ	chaleur latente de vaporisation=2.45 MJ/kg à 20 °C,	MJ/kg
λp	Coefficient de pertes diverses dans le panneau	-
θ	inclinaison du champ PV	° (angle)

INTRODUCTION

Depuis la découverte du système Photovoltaïque, La récupération de l'énergie solaire est devenue l'une des applications les plus prometteuses : dans les pays développés où l'utilisation du Système Photovoltaïque est pour l'instant le plus courant, il sert habituellement de complément d'énergie électrique à usage domestique en milieu urbain, et les panneaux solaires sont placés sur les toits d'habitation. Profitant des conventions écologiques qui préconisent la consommation « d'énergies propres ou renouvelables », son utilisation se généralise, et il est très fréquent de voir des compagnies d'électricité réaliser des installations d'appoints connectées au réseau. De plus, en dépits du coût d'installation qui peut s'avérer conséquent, l'énergie solaire reste très compétitive par rapport aux autres formes d'énergies, et cela malgré le faible taux d'ensoleillement de ces pays développés qui ont majoritairement un climat tempéré.

Dans les pays en voie de développement qui sont pour la plupart équatoriaux ou tropicaux, donc très ensoleillés, et qui ont beaucoup de localités où le réseau électrique est absent, l'énergie Photovoltaïque devrait être par conséquent sans concurrence. Cette réalité est encore plus accentuée dans le cas d'applications au pompage d'eau dans les pays sahéliens tels que le Burkina Faso, du fait de l'adéquation entre la demande maximale en eau, et la disponibilité optimale de la ressource solaire.

Cependant, il est à constater que le pompage d'eau dans les états sahéliens se fait généralement dans le but de satisfaire les besoins des populations et du bétail en eau potable dans les régions où aucun réseau de distribution d'eau n'est prévu ou parvenu. Pour se faire, un choix plutôt judicieux se porte sur les pompes manuelles.

Le défit du développement des états sahéliens passe également par le développement de l'agriculture. Il faut admettre que ces états connaissent habituellement des saisons pluvieuses courtes (de 3 à 4 mois) parfois irrégulières, ce qui occasionne des mauvaises récoltes. Pourtant il n'existe pas encore dans ces états (pour l'ensemble) une forme d'irrigation d'appoint pour compenser les mauvaises saisons, pas plus pour rallonger la période de culture et multiplier le nombre de récoltes, en contraste avec les pays du nord dont le pourcentage des récoltes apporté par l'irrigation est très important (voir encadré1).

Dans le monde, 277 millions d'hectares sont irrigués (année 2002, source FAO) sur 1,4 milliard d'hectares de terres arables au total. Ils fournissent environ 1/3 de la production alimentaire mondiale.

Trois pays (Inde, Chine, États-Unis) représentent 50 % des surfaces irriguées totales. 80 % de la nourriture produite au Pakistan provient de terres irriguées, 70 % pour la Chine, mais moins de 2% pour le Ghana, le Mozambique ou le Malawi.

En France en 2000, 2.63 millions d'hectares de terres agricoles étaient irrigués.

Encadré1 : Contribution de l'irrigation au niveau mondial

Pour les états sahéliens, une forme d'irrigation avec pompage solaire à moindre coût s'impose, l'énergie solaire n'étant pas gratuite! Tout système de récupération

d'énergie solaire à un coût d'installation, des frais de surveillance, de maintenance et de renouvellement.

Des études théoriques et expérimentales ont prouvé que le pompage d'eau solaire pour une irrigation « goutte à goutte » est le meilleur compromis pour développer l'agriculture dans les pays du Sahel, du fait de l'économie d'eau que ce système d'irrigation apporte.

Cependant, du fait qu'un système de pompage d'eau est constitué d'une multiplicité d'organes de fonctionnement, un dimensionnement correct de chacun des éléments constitutifs s'impose : définition des besoins réels en énergie, choix judicieux de la pompe, forme et capacité de stockage de l'énergie, dimensionnement et installation appropriés des cellules photovoltaïques, etc…

Cette étude analysera les différents éléments constitutifs d'une installation solaire pour pompage d'eau pour une irrigation goutte à goutte. Il optimisera les critères de choix et de dimensionnement de ces éléments constitutifs. Des indications seront données sur le mode d'installation dans les régions du Sahel.

Cette étude sera structurée comme suit :

- D'abord nous allons procéder à une description d'une installation type et à une présentation des éléments qui la constituent.

- Ensuite nous allons proposer une méthode de choix et de dimensionnement optimum de ces éléments constitutifs.

- Finalement nous allons apporter une conclusion et des perspectives pour un meilleur dimensionnement de notre installation.

I- SCHEMAS ET DESCRIPTION DU PRINCIPE

Les panneaux solaires photovoltaïques (1) produisent l'énergie électrique sous forme d'un courant continu qui est converti à travers un convertisseur statique (3) pour alimenter un groupe moto - pompe immergé ou flottant (4). Le groupe moto -pompe est composé d'un moteur à courant alternatif mono, bi ou triphasé ou à courant continu à commutation électronique qui est couplé à une pompe centrifuge à étages multiples ou à une pompe volumétrique ou autre suivant le débit recherché.

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes alors que la pompe volumétrique transmet l'énergie du moteur par un mouvement hélicoïdale qui permet littéralement de propulser l'eau à la surface. Les systèmes proposés sont composés de modules photovoltaïques montés sur un châssis de support (2) incliné suivant la latitude du site afin d'optimiser la production photovoltaïque, ou rotatif suivant la course du soleil. Le dispositif est complété par le convertisseur statique (3) monté en surface et qui permet la conversion du courant continu produit par le champ solaire en courant alternatif ou continu pour alimenter le

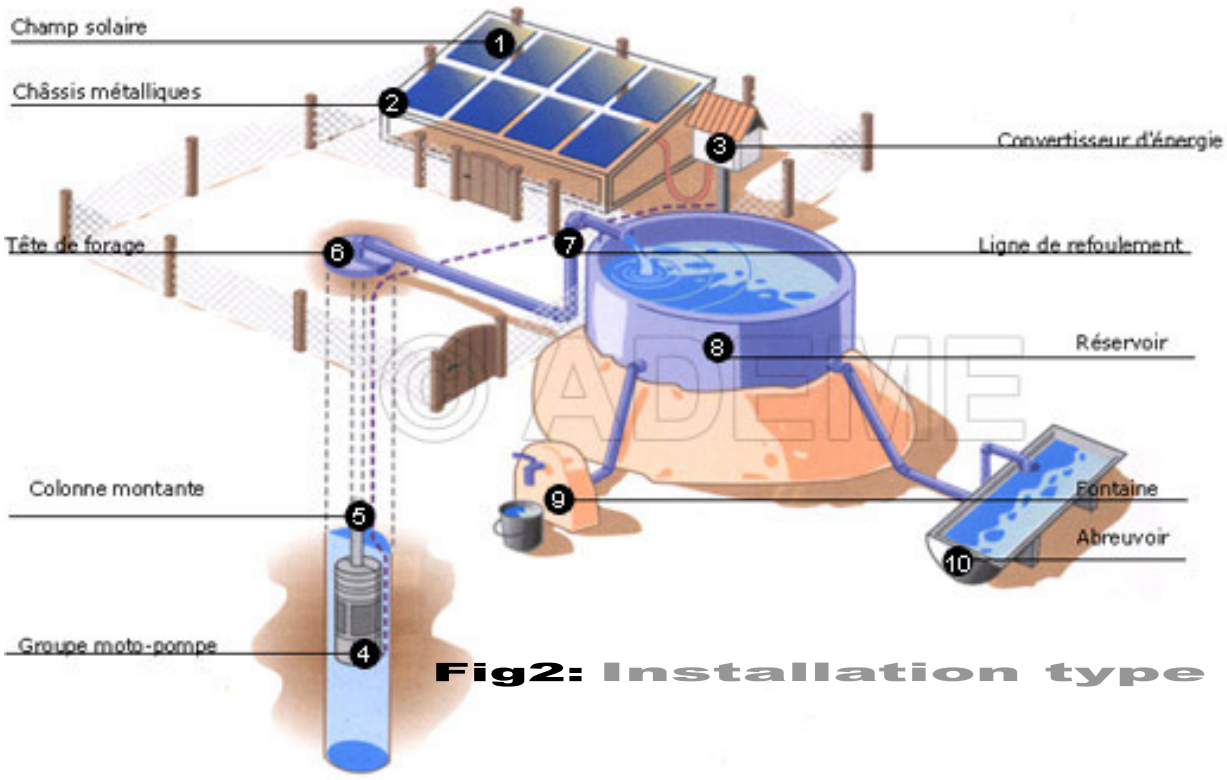


Fig2: Installation type

moteur couplé à la pompe (Fig2).

Le système de pompage peut être à entraînement direct ou à piles. Les dessins de la page suivante illustrent les composantes de chaque type de système (fig3) :

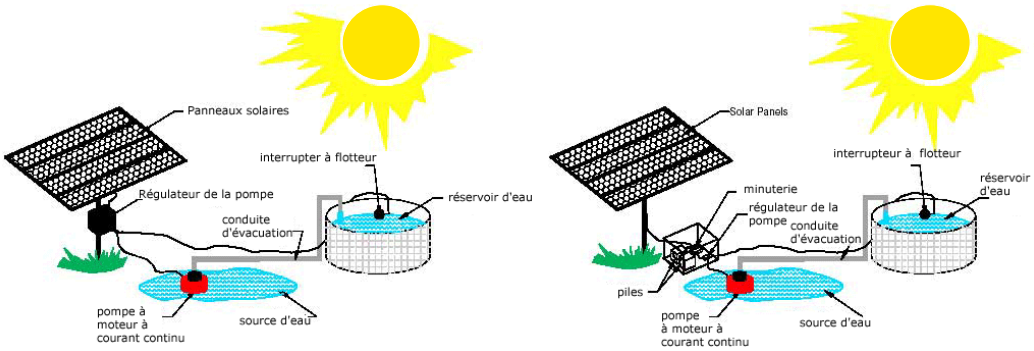


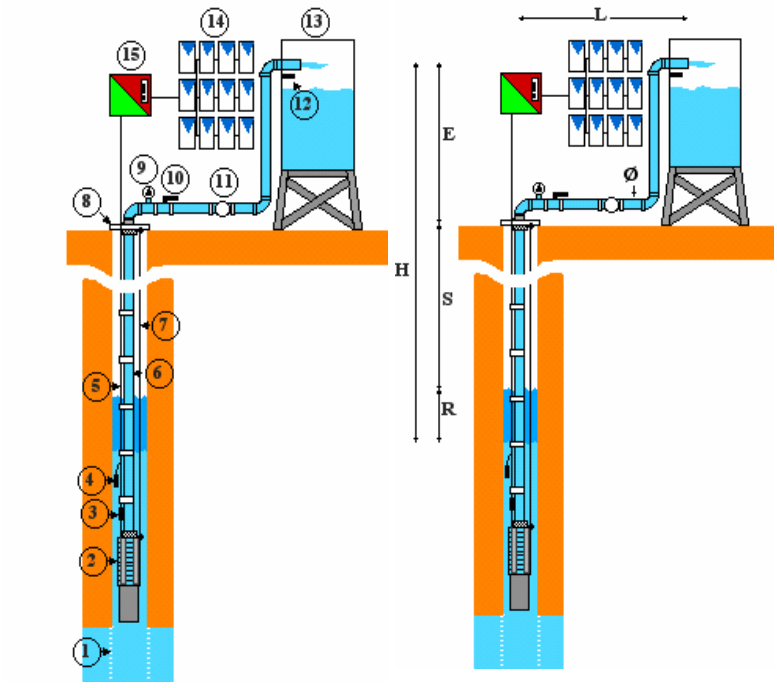
Fig3: Système à entrainement direct — Système à piles

Les deux systèmes doivent comprendre une capacité de stockage d'eau, mais celle du système à piles peut être plus petite que celle du système à entraînement direct, puisque les piles offrent en fait une capacité supplémentaire d'entreposage.

Remarque : Nous nous limiterons au système à entraînement direct.

I-1 DEFINITION GENERALE DU SYSTEME DE POMPAGE D'EAU

La différence entre un système de pompage solaire et un système de pompage classique est l'utilisation de panneaux photovoltaïques [14], d'une convertisseur [15] et d'une pompe adéquate [2] (voir fig4). Les pompes utilisées peuvent être de surfaces ou immergées, centrifuges ou volumétriques selon la condition d'utilisation :



N°	Désignation
1	crépine du forage
2	pompe
3	épissures
4	détecteur niveau bas
5	câblage électrique
6	canalisation
7	élingue de sécurité et de manutention
8	tête de puits
9	manomètre
10	vanne
11	compteur
12	détecteur réservoir plein
13	réservoir
14	panneaux photovoltaïques
15	convertisseur
H	Hauteur
E	Elévation
S	Niveau statique
R	Rabattement
L	Distance horizontale réservoir pompe
Φ	Diamètre canalisation

Fig4 : Système de pompage solaire

I-1-1 Les pompes centrifuges

Les pompes centrifuges (Fig5) utilisent les variations de vitesse du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie mécanique du moteur est transmise au fluide. La vitesse donnée au fluide va fournir une énergie cinétique à celui-ci. L'énergie cinétique est ensuite transformée en énergie de pression.

Fig5 : pompe centrifuge

Les caractéristiques des pompes centrifuges sont :

- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage. (Particulièrement intéressant dans le cadre de l'utilisation des modules photovoltaïques car la pompe tourne même par très faible ensoleillement)
- Il n'y a pas ou presque pas d'aspiration. Elles doivent être amorcées pour fonctionner de manière à éviter tout risque de destruction si fonctionnement à sec. Certaines sont auto – amorçant.
- Peuvent être immergées ou de surface.
- Plusieurs étages (cage + roue à ailettes) peuvent être superposés pour obtenir de grandes pressions.

I-1-2 Les pompes volumétriques

Les pompes volumétriques encore appelées pompes à cavité progressive (fig6) utilisent les variations de volume du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. Le fluide est d'abord aspiré par l'accroissement d'un volume puis refoulé par diminution de ce même volume. Les pompes volumétriques utilisées le plus couramment sont les pompes à pistons, à palettes et à engrenages.

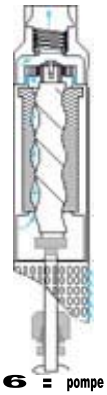


Fig6 : pompe volumétrique

Leurs principaux atouts sont les suivants :

- Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5 m^3/h) et aux grandes hauteurs ;
- Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont auto-amorçantes ;

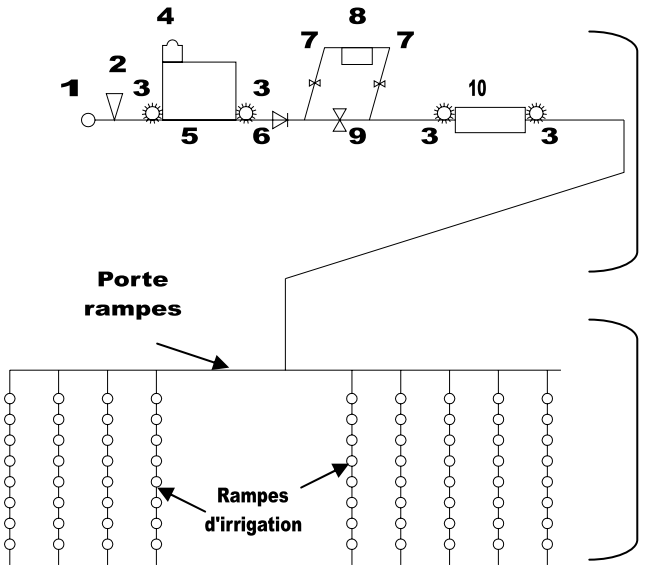
Le couple de démarrage d'une pompe volumétrique (de 3 à 5 fois le couple nominal) et la caractéristique I = f(V) de ce type de pompe font que son fonctionnement en direct sur un panneau photovoltaïque n'est pas économiquement viable. Pour palier au problème de surdimensionnement du générateur résultant de cette inadaptation, un adaptateur d'impédance est utilisé pour permettre un rendement aussi élevé que possible de l'ensemble du système.

I-1-3 Les pompes de surface et les pompes immergées

Le choix d'une pompe se fera en fonction des caractéristiques hydrauliques de l'installation envisagée (débit, hauteur manométrique totale, etc.) mais également en fonction des conditions particulières d'utilisation (puits, forage, pompage de rivière, etc.). Une pompe à pistons placée en surface ne pourra pas relever l'eau au-delà d'un maximum théorique de 10,33 mètres. Au-delà de cette hauteur, il faut s'orienter vers une solution de pompe immergée. Cependant, on peut utiliser des pompes centrifuges avec une pression absolue à l'aspiration inférieure à 1 MPa. Les pompes immergées peuvent extraire de l'eau à plusieurs centaines de mètres. Les pompes centrifuges qui ont une forme adaptée aux puits et qui peuvent débiter à forte pression sont souvent utilisées.

I-2 DEFINITION GENERALE D'UNE IRRIGATION « GOUTTE A GOUTTE »

L'irrigation « goutte à goutte » est appelée aussi « irrigation localisée ou micro - irrigation ». On l'appelle irrigation par « infiltration » lorsqu'elle est réalisée au moyen de tuyaux filtrants enterrés. L'irrigation goutte à goutte se développe de plus en plus dans le but de palier à la rareté de l'eau. Elle se caractérise par un apport d'eau localisé, fréquent et continu utilisant des débits réduits à des faibles pressions. Seule la fraction du sol exploitée par les racines est continuellement humectée. Cela permet une réduction de l'évaporation, une meilleure conservation de la structure du sol et une réduction des mauvaises herbes. Ce système permet aussi d'exploiter des champs à topographie et configuration irrégulières, des sols lourds qui se fissurent en été, ou des sols légers filtrants. La fréquence élevée des arrosages permet une dilution des sels présents dans la solution du sol sous le distributeur et un maintien des sels à la périphérie du bulbe humecté.



Légende	
1	Source d'eau
2	Régulateur de pression
3	Manomètre
4	Ventouse
5	Station de filtration
6	Clapet anti-retour
7	Vanne
8	Matériel d'injection d'engrais
9	Vanne de régulation de pression
10	Filtre à disque

Fig7: Schéma d'un réseau d'irrigation

Le réseau d'irrigation (fig7) est composé d'une station de tête qui comprend les systèmes de filtration et d'injection ainsi que des accessoires relatifs à la régulation de pression et à la protection du système, et d'un réseau de distribution. Celui-ci est composé de conduites d'amenée et de secteurs d'irrigation.

Encadré2 : On peut distinguer plusieurs techniques d'irrigation :

- manuelle (arrosoir, seau...), réservée aux très petites surfaces ;
- par écoulement de surface, sous le simple effet de la gravité, au moyen de canaux et rigoles ;
- par aspersion, technique qui consiste à reproduire la pluie ;
- par goutte à goutte, pour une irrigation de précision, ou micro-irrigation, destinée à économiser l'eau ;
- par infiltration, au moyen de tuyaux filtrants enterrés, variante de la technique du goutte à goutte ;
- par inondation ou submersion, technique appliquée dans les rizières.
- par application gestion globale de l'eau grâce à une répartition systématique des excédents d'eau et leur réinfiltration profonde.

Le goutte à goutte permet une économie de l'eau (50 à 70 % par rapport au gravitaire et 30% par rapport à l'aspersion) et une utilisation de la ferti - irrigation ou fertirrigation, technique qui consiste à amener le fertilisant dilué dans l'eau au pied des plantes pour en éviter le gaspillage et réduire la pollution des nappes phréatiques par les engrais. Par rapport aux autres systèmes d'irrigation (encadré2), le goutte à goutte (encadré3) permet également une baisse des dépenses en énergie utilisée dans le pompage, une réduction du coût de la main d'œuvre impliquée dans les opérations de l'irrigation et de la fertilisation, et une baisse des quantités d'eau et d'engrais utilisés.

Encadré3 : Récapitulatif des méthodes d'irrigation goutte à goutte

Méthodes nécessitant uniquement de la main-d'œuvre et des matériaux locaux

- Des pots de céramique poreux cuits à chaleur modérée sont posés à la surface ou enfouis dans le sol à l'intérieur de la rhizosphère. Lorsqu'ils sont remplis d'eau et d'engrais dissous, les réceptacles d'argile perméable exsudent de l'eau et des éléments nutritifs dans le sol.
- Des tuyaux de céramique sectionnés constituent des sources linéaires qui humidifient un volume de sol de forme allongée.

Méthodes basées sur des matériaux importés, mais assemblés sur place

- Des tuyaux de plastique moulé ou des canalisations de plastique extrudé sont perforés à la main et posés sur le sol pour simuler une irrigation au goutte-à-goutte.
- Des sections verticales de tuyaux de plastique (ou même des récipients de plastique mis au rebut, bouteilles, etc.) sont enfouies dans le sol.
- Des récipients de plastique à parois minces sont remplis de sable ou de gravier pour fournir une résistance mécanique à l'écrasement.
- Des manchons de plastique recouvrent les sections perforées des tuyaux pour empêcher les racines de pénétrer dans les orifices d'évacuation.
- Des filtres à sable empêchent les particules en suspension ou les algues d'obstruer les orifices de sortie.
- Des récipients auxiliaires sont utilisés pour dissoudre et injecter l'engrais dans l'eau d'irrigation.
- Des tubes allongés verticaux ou hampes sont utilisés pour déverser l'eau amenée par une conduite souterraine dans de petits bassins.

Méthodes basées sur des éléments importés*

- Les assemblages de goutteurs et de microasperseurs fabriqués industriellement sont soigneusement supervisés et entretenus.
- Des équipements accessoires, tels que filtres à grille et filtres remplis de matières diverses, valves doseuses, régulateurs de pression et injecteurs d'engrais sont utilisés dans divers assemblages.

*** Ces options ne sont justifiées que pour l'arrosage des cultures commerciales dans une économie de marché stable**

I-3 DEFINITION GENERALE D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Un générateur photovoltaïque (PV) produit de l'électricité à partir du rayonnement solaire. Les cellules PV sont réalisées la plupart du temps dans un matériau semi-conducteur (le silicium, par exemple). Ce sont les photons de la lumière qui, en frappant la cellule, déplacent les électrons dans le matériau et génèrent ainsi une circulation continue des électrons : c'est le courant électrique (fig8).

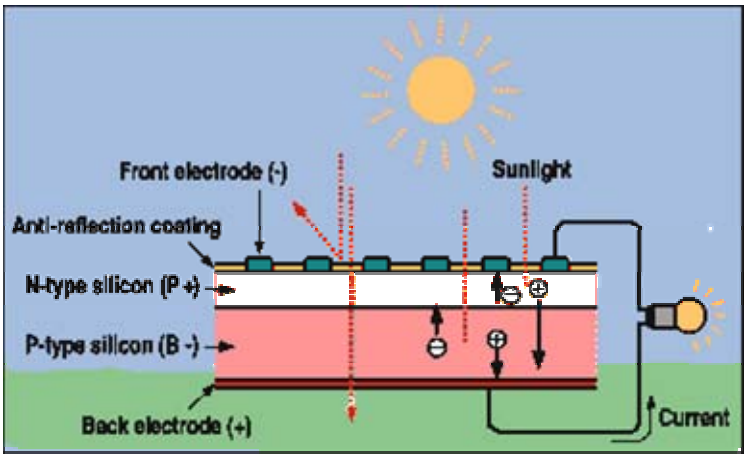


Fig8: schéma de principe

Dans la plage habituelle d'utilisation (plage à courant quasiment constante), une cellule PV peut être considérée comme un générateur de courant. Le courant généré dépend essentiellement de l'éclairement (W/m²) et de la température d'équilibre de la cellule PV (fonction de la température extérieure et de la vitesse de l'air ambiant). La tension est fonction des matériaux constitutifs de la cellule.

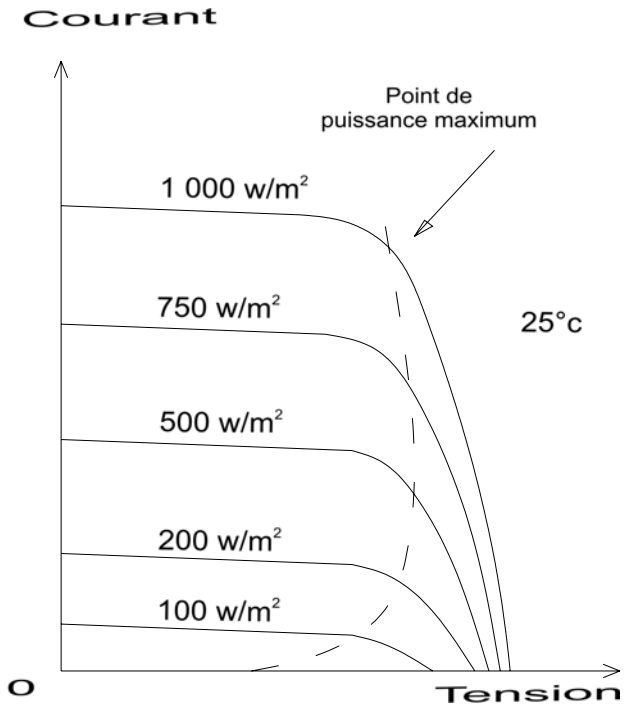


Fig9: Caractéristique U-I

Le fonctionnement d'une cellule peut être représenté par un réseau de courbes, qui indique l'évolution du courant généré par la cellule en fonction de la tension aux bornes de la cellule (fig9). Chaque courbe est fonction notamment de l'éclairement et de la température (extérieure ou de la cellule).

Un panneau solaire est l'assemblage en série et en parallèle des cellules PV. Cet assemblage permet d'obtenir les tensions et les intensités souhaitées (par exemple, des panneaux de 12 Vcc, 24 Vcc ou plus).

A titre indicatif, 72 cellules de 10,2 mm par 10,2 mm en silicium poly-cristallin assemblées en 8 séries parallèles de 14 cellules, constitueront un panneau capable de produire environ 120 W/m^2, soit environ 24 V, 5 A. Ceci pour un éclairement solaire de 1000 W/m², une température ambiante de 25 °C et un spectre solaire de 1,5.

I-4 PRESENTATION DE LA METHODE DE DIMENSIONNEMENT

Deux principaux objectifs sont visés en ce qui concerne le dimensionnement de notre système solaire ici étudié et destiné aux pays sahéliens : l'économie d'eau, et l'économie financière. Autrement dit, un système photovoltaïque, pour le pompage d'eau pour une irrigation « goutte à goutte » bien dimensionné doit pouvoir combler les besoins en quantité d'énergie qu'on en attend, tout en étant le moins coûteux tant au moment de son installation que dans sa phase de production, et doit fonctionner pendant une période raisonnable garantissant son amortissement.

C'est pourquoi, trois (3) phases ont été détectées pour parvenir à un dimensionnement optimal :

1e Phase : Détermination des besoins en eau du champ à irriguer.

Cette phase nécessite une connaissance du type de plantes à irriguer, de la nature des sols, du type d'irrigation goutte à goutte choisi et des conditions atmosphériques (vents, humidité, etc.) ; A cela, on associera toutes les pertes d'eau dues à l'évaporation lorsque le bassin de rétention est ouvert. Un choix sur l'autonomie recherchée doit être fait pour définir une capacité de stockage d'eau. Le débit recherché au niveau des goutteurs peut conditionner la hauteur de stockage.

2e Phase : Dimensionnement et choix du type de motopompe.

Cela est fonction de la profondeur du forage, de la hauteur de stockage, du débit de pompage recherché, de son alimentation électrique en continu ou alternatif mono ou triphasé, etc.

3e Phase : Dimensionnement et montage du système PV.

Ce dimensionnement tient compte (en gros) de la puissance nominale de la pompe majorée des différentes pertes (conversion de tension, régulation, etc.) et de l'ensoleillement du site. Son montage (Orientation) dépend de sa position géographique (longitude).

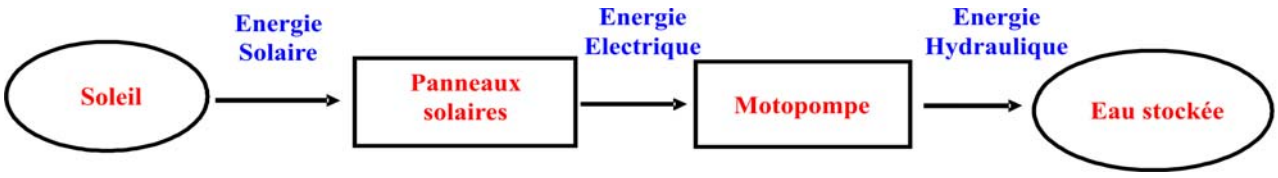


Fig10: processus de transformation d'énergie

II- DETERMINATION DES BESOINS EN EAU

II-1 BESOINS EN EAU DES PLANTES A IRRIGUER

II-1-1 Méthodologie

Dans le cas d'une irrigation goutte à goutte, l'eau est déversée sur la plante le plus fréquement possible ou en continu, et quotidiennement. Quant à la détermination de la quantité d'eau à apporter, on doit irriguer de sorte à compenser les pertes par évaporation et à prévenir la salinisation de la rhizosphère (fig11).

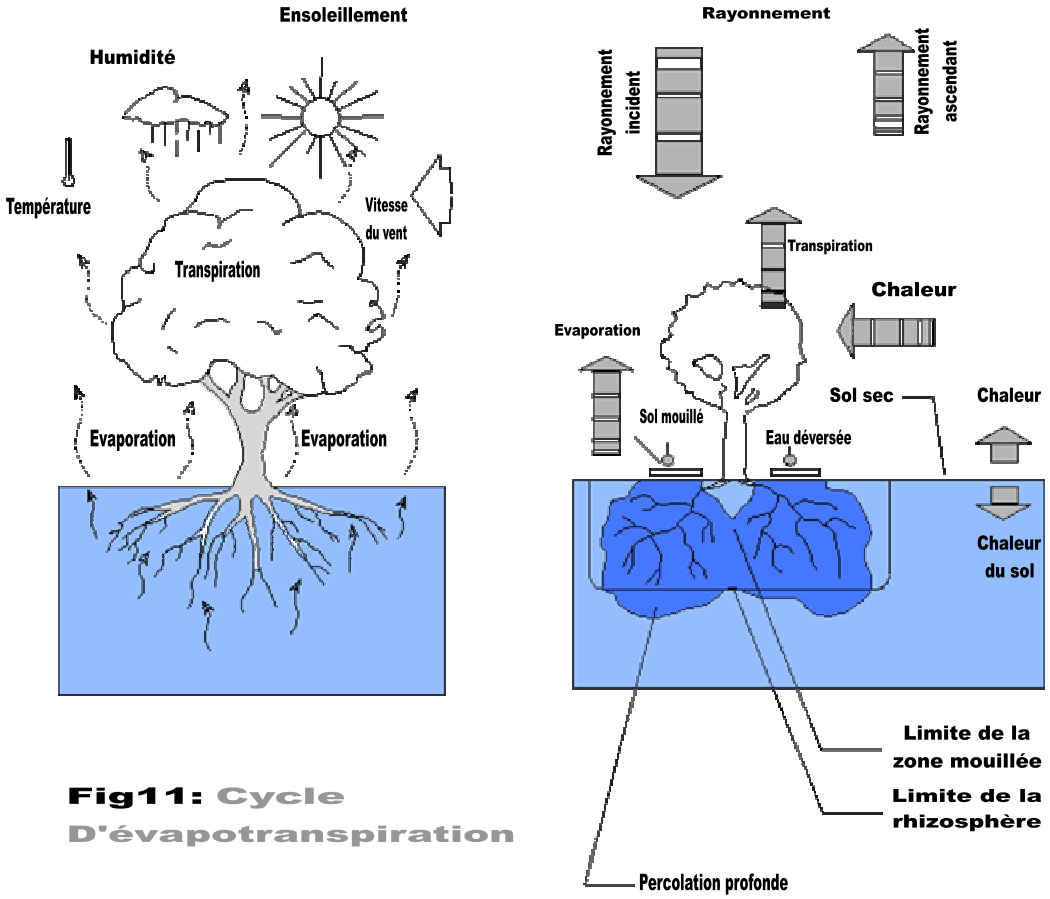


Fig11: Cycle D'évapotranspiration

II-1-2 Modes de calcul

Les pertes par évapotranspiration dépendent des conditions météorologiques, qui varient au fil du temps. Pour les déterminer, on peut observer les variables météorologiques pertinentes (température, vent, humidité atmosphérique et ensoleillement), puis appliquer l'une des nombreuses équations fonctionnelles ou formules permettant de calculer l'évapotranspiration potentielle.

La formule de base utilisée pour déterminer le besoin en eau est l'équation de Penman donnant l'évapotranspiration de référence ET_0.

$$ET_0 = c\left[W \times R_n + (1-W) \times f(u) \times (e_a - e_d)\right] \quad (01)$$

Cette formule a été améliorée par celle de Penman-Monteith qui inclut les paramètres de rugosité et de résistance de surface normalisée. Cela permet de palier à la faiblesse que les recherches ont indiquée dans le calcul de la fonction du vent f(u), le déficit de la pression de vapeur, le rayonnement net de longues longueurs d'onde et l'utilisation du coefficient de correction c. Après cet ajustement, l'équation de Penman-Monteith peut alors être utilisée dans toutes les régions du globe, se servant de surcroît des seuls facteurs climatiques.

$$ET_0 = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \qquad (02)$$

Il existe bien d'autres équations plus ou moins simples, car réduisant le nombre de paramètres qui entrent en ligne de compte dans le calcul de l'ET_0, mais elles ne sont utiles que dans le cas où les données météorologiques feraient défaut. Le travail de S. Bouhlassa et S. Paré fait un bilan et une comparaison de ces méthodes et relève les écarts de calcul par rapport à la méthode de Penman-Monteith. Quand au tableau1, celui-ci recense les modèles d'ETP couramment utilisés.

Une autre méthode, plus simple, consiste à estimer les pertes par évaporation en

Tableau1 : Modèles d'ETP recensés dans la littérature

Classification	Méthode	Données nécessaires	Pas de temps
Combinatoire	Penman (1948)	e_d, T, U, D	Journalier
	Penman-Monteith (1965)	e_d, T, U, D	Journalier
	Priestley-Taylor (1972)	T, D	Journalier
	Kimberly-Penman (1982)	e_d, T, U, D	Journalier
	Thom-Oliver (1977)	e_d, T, U, D	Journalier
Aérodynamique	Dalton (1802)	e_d, U	Journalier
Température	Thornthwaite (1948)	T, D	Mensuel
	Blaney-Criddle (1959)	T, D	5 jours
	Hamon (1961)	T	Journalier
	Romanenko (1961)	e_d, T	Journalier
	Linacre (1977)	e_d, T	Journalier
Rayonnement	Turc (1961)	e_d, T, D	Journalier
	Jensen-Haise (1963)	T	5 jours
	Mc Guinness-Bordne (1972)	T	Mensuel
	Hargreaves (1975)	T	10 jours
	Doorenbos-Pruitt (1977) (FAO-24)	e_d, T, U, D	Journalier
	Abtew, (1996)	e_d, T, D	Journalier
	Makkink (1957)	T	Journalier

T = Température ; U = Vitesse du vent ; D = Durée d'ensoleillement / Rayonnement ; ed= Pression de vapeur effective de l'air

mesurant directement le taux d'évaporation à l'aide d'un évaporimètre standard. Il s'agit d'un récipient peu profond rempli d'eau, que l'on pose sur le sol à l'intérieur de la zone irriguée. On peut calculer facilement la quantité d'eau qui s'évapore chaque jour en mesurant le volume d'eau perdu. L'évaporimètre donne une indication de l'effet conjugué des rayonnements solaires, du vent, de la température et de l'humidité sur l'évapotranspiration dans un champ (fig12). Lorsque l'évaporimètre est installé selon les précautions de fonctionnement optimal, nous pouvons utiliser la formule ci – contre :

Fig12: Evaporimètre

$$Ir = 0.3 \times E_{bac} \times (1 + C) - R \quad (03)$$

Cette formule intègre les approximations suivantes :

$$ETP_{couverture_totale} = 0.66 \times E_{bac} \quad (04)$$

$$ETP_{couverture_partièle} = 0.33 \times (1 + C) \times E_{bac} \quad (05)$$

$$Wn = 0.80 \times ETP \quad (06)$$

$$L = 0.1 \times ETP \quad (07)$$

II-1-3 Récapitulatif et Exemples

Le tableau2 fait l'inventaire des techniques d'estimation de l'évapotranspiration et des paramètres nécessaires à leur calcul.

Ces valeurs trouvées par la méthode analytique doivent uniquement être considérées comme des estimations préliminaires. Des mesures en champ des réponses d'une culture spécifique à des quantités variables d'eau d'irrigation, dans les conditions locales, devraient fournir des orientations plus fiables sur les quantités optimales d'eau à déverser. En outre, les estimations ci-dessus se réfèrent seulement aux stades de croissance active de la plante. Lorsqu'un végétal arrive à maturité, ses besoins en eau diminuent naturellement. L'irrigation est interrompue quand sa contribution au rendement devient négligeable.

Remarque : D'autres calculs sont effectués lorsque l'on pratique la fertirrigation. Celle-ci peut en effet nécessiter un apport d'eau supplémentaire plus ou moins important en comparaison avec l'apport strictement nécessaire à l'irrigation. L'étude du besoin en eau doit par conséquent en tenir compte.

Tableau2 : Récapitulatif des techniques d'estimation de l'évapotranspiration

Classification	METHODE	COMMENTAIRES
Mesures, évaporomètres	Bacs à évaporation et Evaporomètre Piché	Méthode la plus simple pour déterminer l'évaporation mais difficulté de normalisation et d'extrapolation.
	Lysimètre	Mesure la plus fiable de l'évapotranspiration à l'échelle ponctuelle.
Méthode de calcul à base physique ou Mesure des flux	**Méthode « directe »** des fluctuations	Méthode la plus satisfaisante sur le plan théorique, mais fortes exigences technologiques et estimations ponctuelles.
	Méthodes « indirectes »	
	Méthode des gradients	
	Méthode des profils	
	Méthodes aérodynamiques	
	Méthodes du bilan d'énergie	Nécessite la connaissance de la température de surface.
Méthodes empiriques ou par estimation de l'ETP	Méthodes basées sur la température Méthodes basées sur le rayonnement Méthode de Dalton Méthode par combinaison (Penman)	Ces méthodes étant discutées au Chapitre 1, rappelons juste qu'elles sont largement utilisées en hydrologie, et qu'elles font appel à quatre paramètres climatiques (température de l'air, humidité relative, rayonnement et vitesse du vent)

Enfin, des informations sur le besoin en eau de tout type de plantes couramment cultivées dans les régions sahéliennes doivent être disponibles au Centre de Semences Forestières. A titre d'exemple, pour une région tropicale les besoins en eau, en moyenne, peuvent être définis en utilisant les valeurs suivantes :

Agriculture maraîchère	60	m3/hectare/jour
Riz	100	m3/hectare/jour
Autres céréales	45	m3/hectare/jour
Sucre de canne	65	m3/hectare/jour
Coton	55	m3/hectare/jour

Ces valeurs sont définies pour les quantités d'eau de pluie et doivent être ajustées dans le cas d'une irrigation goutte à goutte.

II-2 ETUDE DU STOCKAGE DE L'EAU.

Le stockage de l'eau dans le cadre d'une irrigation « goutte à goutte » est quasi obligatoire du fait des impératifs que cette forme d'irrigation suscite. On distingue de ce fait 3 (trois) principales raisons :

1 - lorsqu'on opte pour une irrigation « goutte à goutte », c'est que l'on a pour premier souci de réguler l'eau en évitant le gaspillage. Cela ne peut se faire que s'il y a une rétention préalable de l'eau pompée au fil du soleil, suivie d'un contrôle de son versement au pied de la plante.

Fig13:
Système goutte-à-goutte Nica drip fonctionnant avec 1 m de pression et qui a été composé de tuyaux fabriqués localement.
Insertion: *Tube avec goutteurs en ligne.*

2 – La plupart des pompes délivrent un débit variable en fonction de l'ensoleillement comme nous le verrons plus loin. La présence d'un dispositif de rétention permet par sa position par rapport au niveau du sol, un contrôle plus ou moins précis du débit que l'on souhaite avoir au niveau des goutteurs. Par ailleurs, un compromis est à trouver concernant ladite hauteur de la cuve de stockage, car plus la cuve est haute, plus il va falloir utiliser une pompe de grande puissance pour tirer l'eau du forage jusqu'à elle. La solution du moindre coût impose une cuve à même le sol.

Pour se faire, des méthodes d'irrigation « goutte à goutte » ne nécessitant pas une grande élévation de la cuve se développent : on peut énumérer quelques-unes telles que :

- La méthode « Pepsi Drip » et sa variante « Easy Drip ». Elles nécessitent une hauteur de bassin de 1.5m à 3m.
- La méthode « Nica Drip » (fig13) peut fonctionner avec des pressions de cuve d'eau à 0.5m. Des cuves à même le sol peuvent ainsi être construites avec des matériaux simples et peu coûteux.

Ces méthodes d'irrigation « goutte à goutte » sont recommandées pour les petits producteurs à petit budget travaillant sur des petites surfaces. Ces méthodes utilisent généralement des matériaux locaux : les installations de drainage sont faites en tuyaux souples d'une durée de vie allant d'une année (pour le Pepsi Drip) à 5 ans (Nica Drip). Le bassin peut être construit en ferro - ciment. Ces méthodes d'irrigation ont pour inconvénient majeur d'avoir une forte proportion de goutteurs qui se bouchent du fait même des petites pressions utilisées.

Pour une irrigation « goutte à goutte » semi - industrielle, il faut s'acheminer vers la mise en place d'installations avec des tuyaux de qualité supérieure, des goutteurs industriels, et surtout une rétention d'eau à une hauteur plus importante. Le réglage du débit (et donc de la pression) se fera par des dispositifs judicieusement implantés tout au long de la chaîne de drainage.

3 - Un dispositif de rétention est finalement nécessaire pour les périodes d'ensoleillement insuffisant. Une quantité d'eau supplémentaire doit être étudiée en fonction de l'autonomie recherchée.

II-3 DIMENSIONNEMENT DE LA CAPACITE DE STOCKAGE D'EAU

Le dimensionnement du dispositif de rétention d'eau se fait par projection des besoins. Ces besoins intègrent l'estimation consécutive au calcul de l'évapotranspiration appliqué à la surface du champ à cultiver, et l'autonomie recherchée en cas de mauvais temps (méthode détaillée en II-1).

Il est possible de tenir compte des pertes par évaporation si le bassin est ouvert. On peut utiliser la formule laborieuse mais plus rigoureuse de l'évaporation de Penman à condition bien entendu de disposer de tous les paramètres :

$$E = \frac{\Delta + 2\times\gamma}{\Delta + \gamma}\times E_c - \left(\frac{\gamma^{(2-\lambda)}\times E_a}{\Delta + 2\times\gamma}\right) \quad avec \quad \gamma = \frac{C_p \times P}{\varepsilon \times \lambda}\times 10^{-3} = 0.00163 \times \frac{P}{\lambda} \tag{08}$$

$$E_a = 0.0484 \times (1 + 0.6 \times u) \times (e_s - e_a) \tag{09}$$

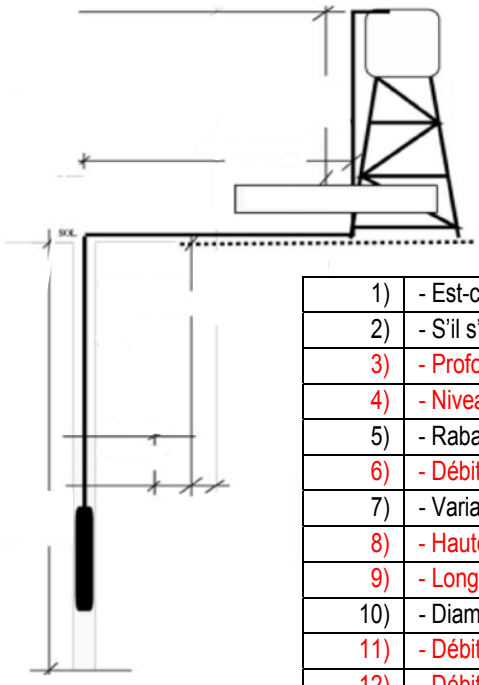
On peut également se servir de formules plus simples comme celle couramment utilisée pour déterminer les évaporations d'une piscine en plein air. La formule de Rohwer ci-dessus est généralement utilisée à cet effet.

Si l'on dispose d'un évaporimètre, le travail est alors plus simple, car il suffira de corréler le volume manquant dans l'évaporimètre au rapport des surfaces du bassin et de l'évaporimètre.

III- CHOIX ET DIMENSIONNEMENT DE LA MOTO-POMPE

III-1 CHOIX DE LA MOTO-POMPE

Le dimensionnement d'un système de pompage doit être fait avec une grande attention. Il faut tenir compte de différents paramètres énumérés ci-dessous (fig14). Les paramètres en rouge sont strictement nécessaires.



1)	- Est-ce qui s'agit d'un forage, d'un puit, d'un cours d'eau, …
2)	- S'il s'agit d'un puit ou d'un forage, quel est son diamètre
3)	- Profondeur du forage ou du puit en mètre
4)	- Niveau statique du forage en mètre
5)	- Rabattement en mètre
6)	- Débit horaire du puit ou forage a e rabattement en m3/h
7)	- Variation saisonnière du niveau statique en mètre
8)	- Hauteur verticale de refoulement en mètre
9)	- Longueur horizontale
10)	- Diamètre intérieur de la canalisation horizontale en mètre (si existante)
11)	- Débit minimum désiré en m3 par jour pendant la période la plus ensoleillée
12)	- Débit minimum désiré en m3 par jour pendant la période la moins ensoleillée
13)	- Période d'utilisation

Fig14 : Paramètres d'un système de pompage

La classification des pompes peut se faire selon différents critères :

1- Conception :
- Centrifuge
- Déplacement positif

2- Position dans le système :
- De surface
- Immergéé

3- Type de moteur utilisé :
- Courant continu
- Courant alternatif

La figure ci-dessous indique les cas d'utilisation des types de pompes (fig15) :

En résumé nous pouvons dire que les pompes centrifuges sont généralement utilisées pour les puits profonds et les débits importants. Les pompes à déplacement positif sont par contre utilisées pour les débits faibles.

Quand au moteur, le CC est généralement plus efficace et plus facile à utiliser avec un système PV, mais malheureusement moins accessible financièrement que le CA. Ce dernier nécessite cependant l'utilisation d'un onduleur pour fonctionner avec les systèmes PV.

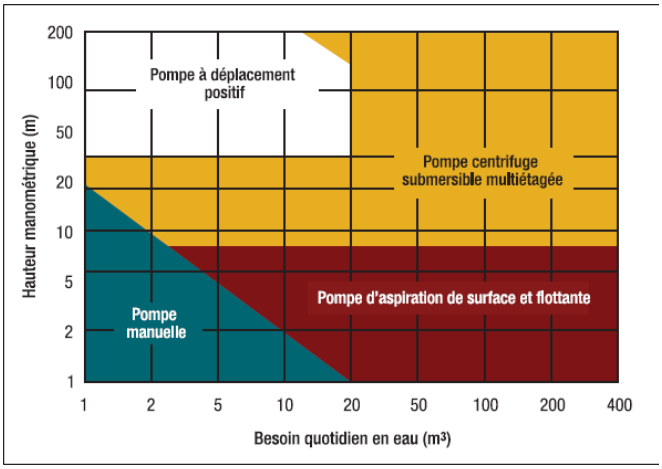
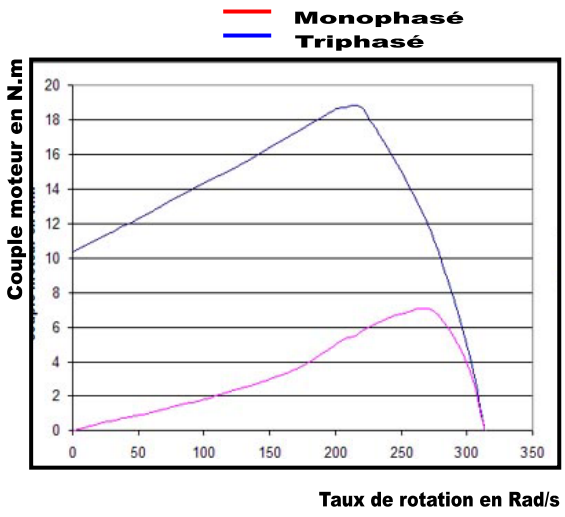


Fig15 : Sélection du type de pompe

	Moteur à courant continu	Moteur asynchrone
Avantages	* Facilité de régulation (variation du vitesse, couple, ...) * Rendement de 90%	* Fiabilité : nécessite peu d'entretien * Rendement de 90%
Inconvénients	* Coût d'entretien : Le système balai collecteur est à changer	* Difficulté et coût de régulation (nécessite la réalisation de commandes vectorielles)

Le choix du moteur alternatif monophasé ou triphasé peut être expliqué par le tableau et la figure ci-dessous (fig16) : L'inconvénient majeur du mono est le couple nul au démarrage, mais il y a possibilité de démarrer en diphasé.



	Moteur Monophasé	Moteur Triphasé
Couple de démarrage	0 N.m	10.33 N.m
Courant magnétisant	1.398 A	0.931 A
Courant de démarrage	9.87 A	17.95 A

Fig16 : Comparaison du fonctionnement d'un moteur mono et triphasé

III-2 DIMENSIONNEMENT DE LA MOTO-POMPE

La courbe qui caractérise le fonctionnement d'une moto-pompe en fonction de la variation de l'ensoleillement peut se rapprocher de la courbe ci-dessous (fig17) : l'axe des ordonnées est gradué à droite en W et à gauche en %. L'amplitude du débit de la moto-

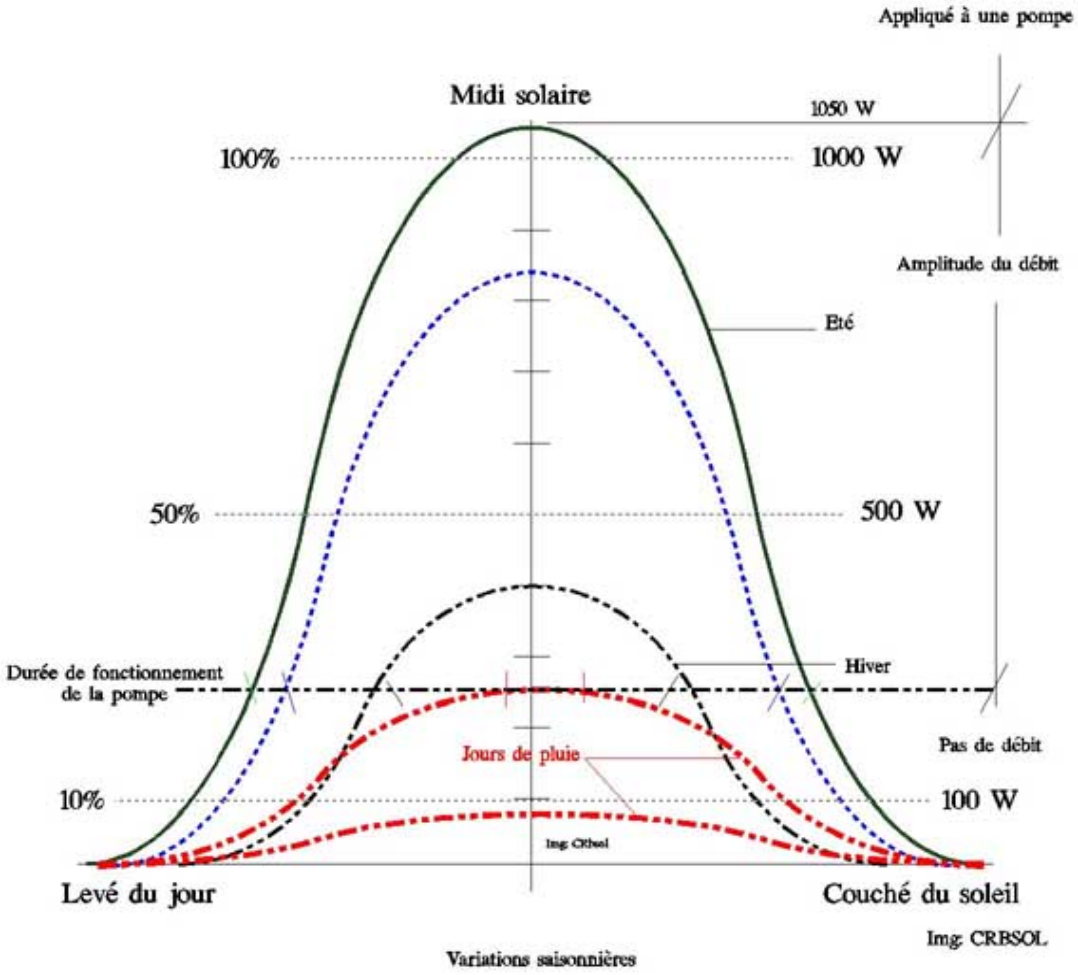


Fig17 : Variation journalière de l'ensoleillement

pompe est indiquée à droite. La moto-pompe commence à débiter à partir d'une certaine puissance fournie par les modules solaires (ici sur le graphe environ 250 Watts). Le débit de la pompe, quasiment nul à cette puissance, augmentera proportionnellement avec l'ensoleillement pour atteindre le maximum à midi solaire. Remarquer l'influence des saisons ou de la météo. Le démarrage du fonctionnement de la moto-pompe est fonction du type de celle-ci, et de la profondeur de pompage.

III-2-1 Dimensionnement par la méthode graphique

Cette méthode graphique a pour but de partir de l'étude d'un cas particulier de dimensionnement afin de dégager une méthode générale. Cette méthode s'appuie sur des abaques qui accompagnent généralement les moto-pompes. Elle à pour pertinence le fait qu'elle est l'une des méthodes recommandées par les constructeurs.

L'abaque de la fig18 est celui d'une moto-pompe centrifuge. Il indique pour une moto-pompe donnée, les débits obtenus pour chaque puissance fournie par les modules solaires photovoltaïques. On peut constater par exemple qu'avec une puissance de sortie de 175 watts environ, cette moto-pompe débite $6m^3$ à l'heure à 2 mètres de HMT (hauteur manométrique totale), $2m^3$ à 5 mètres, et $0m^3$ pour les autres hauteurs. Avec une puissance de 400 watts, on obtient $13m^3$ à 2 m; $10m^3$ à 5 m; $7m^3$ à 7 m; $5.5m^3$ à 9 m; $4m^3$ à 11 m; $2\ m^3$ à 13 m et enfin $0m^3$ à 13 m.

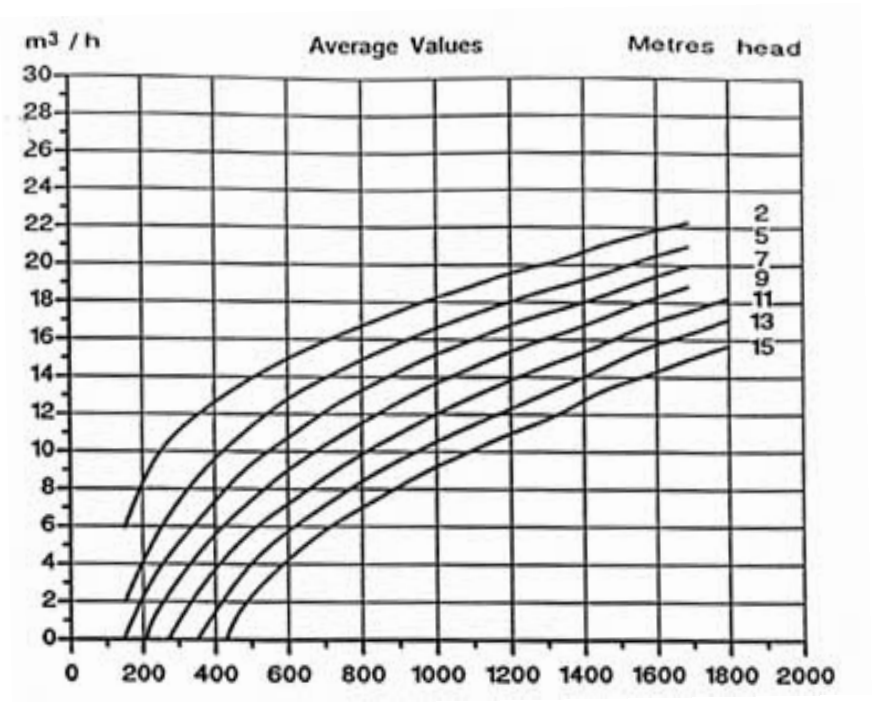


Fig18 : caractéristique de fonctionnement d'une pompe centrifuge

On peut remarquer que pour ce type de moto-pompe, la moindre erreur sur le dimensionnement peut avoir de graves conséquences. A l'évidence, toute moto-pompe a sa fourchette de hauteur manométrique qu'il faudra étudier avant de choisir.

Voici un autre abaque de fonctionnement d'une moto-pompe centrifuge intéressant des moto-pompes solaires photovoltaïques (fig19). Cet abaque intègre les paramètres : Ensoleillement moyen - Débits – Puissance du champ PV - et HMT, d'une moto-pompe. Elle permet de déterminer la puissance des modules solaires photovoltaïques à mettre en place, en connaissant le débit désiré, le lieu de l'installation, la profondeur du forage, et la hauteur de refoulement (HMT) de la moto-pompe solaire.

Comment l'utiliser? Par exemple, connaissant le débit (60 M^3/jour), à une hauteur de 9 m, tirons un trait horizontal à partir de 60 m^3. Ce trait coupe les courbes de débit, notamment celle correspondant à 9 mètres. Plaçons le point de croisement. De ce point, tirons une ligne verticale, qui va croiser les courbes d'ensoleillement que nous repèrerons. Enfin, de ce dernier point, traçons une nouvelle droite en direction de l'échelle "Wp" Qui signifie Watts crêtes, et lisons une valeur. Dans notre cas, en supposant que l'ensoleillement du lieu de l'installation soit de 6 KWh/m²/jour, nous trouvons environ 900! Ce qui signifie qu'il faut installer 900 Wc au minimum de modules solaires photovoltaïques pour obtenir le débit désiré...

Alors se posent les problèmes de l'ajustement de la caractéristique U/I de la moto-pompe par rapport à celle du système PV :

En effet, la moto-pompe fonctionne sous une certaine tension, admettons 120 Volts. Il faudrait placer au moins 7 (7x15v=105v) modules solaires en série pour obtenir cette tension. Cependant 7 modules solaires de 50W ne font que 7 x 50 = 350Wc. Il faut au moins deux branches en parallèle 350 + 350 = 700W. Ici, nous pouvons reprendre la courbe et faire la démarche inverse ! Partant de 700Wc, nous coupons la courbe d'ensoleillement et remontons sur la courbe HMT pour lire un débit de : 43m^3 environ. Si le débit de 43m^3 s'avère trop faible, il faudra placer 350 Watts de modules solaires supplémentaires soit 1050 Wc, et recommencer la lecture sur la courbe. Cela donne un débit de 80m^3 par jour, avec 21 modules solaires photovoltaïques.

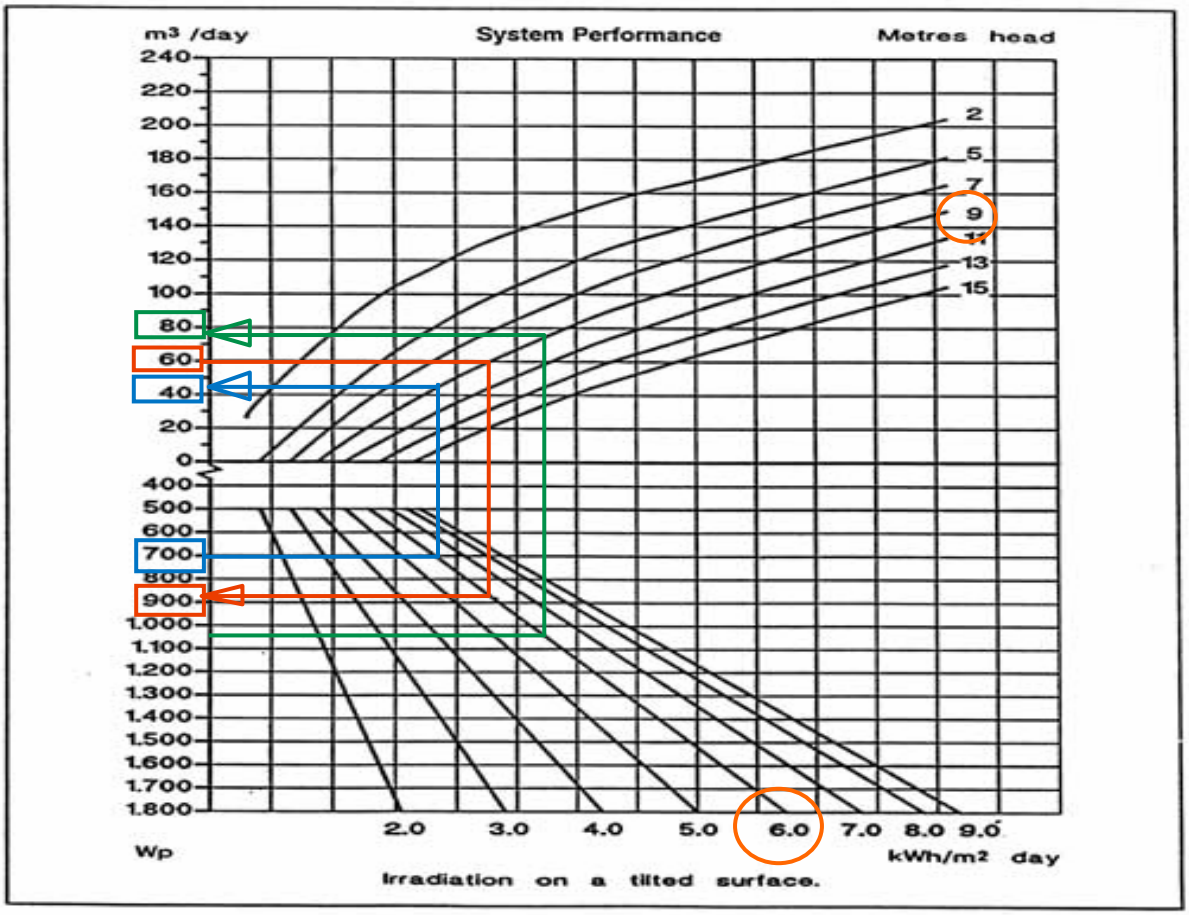


Fig19 : Courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge et dimensionnement PV

A travers l'étude graphique, nous pouvons situer où se trouvera la difficulté du dimensionnement : en effet, la méthode ne consiste pas seulement à faire le calcul d'une puissance, mais il faudra s'assurer que l'agencement des panneaux permettra de satisfaire cette puissance, et cela du fait de l'imposition de la tension d'alimentation des moto-pompes.

III-2-2 Dimensionnement par la méthode analytique

Le modèle pour les systèmes de pompage de l'eau est basé sur les équations de Royer et Coll. (1998) comme le montre l'organigramme (fig20), la demande énergétique hydraulique quotidienne E_{hydr} en J, correspond à l'énergie nécessaire pour élever à une hauteur h (en m), un volume quotidien Q (en m^3/j), avec η un facteur qui tient compte des pertes de charges :

$$E_{hydr} = 86400 \times \rho \times g \times Q \times h \times (1+\eta) \quad (10)$$

h x (1+ η) peut être remplacé par (h + η_m) dans l'équation (10) avec η_m les pertes de charges en mètre.

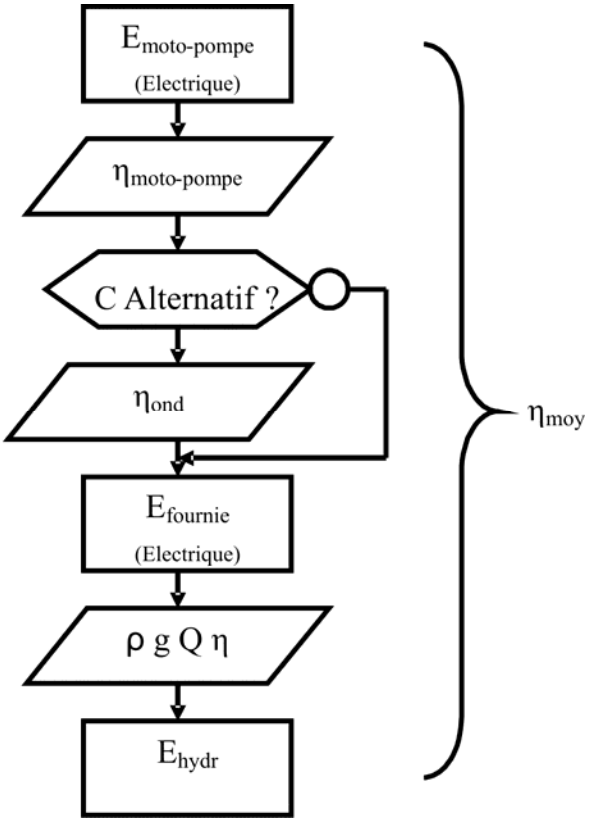


Fig20 : Organigramme du Système de pompage

L'énergie hydraulique se traduit en une demande d'énergie électrique $E_{moto\text{-}pompe}$ par :

$$E_{moto-pompe} = \frac{E_{hydr}}{\eta_{moto-pompe}} \quad (11)$$

Où $\eta_{moto\text{-}pompe}$ est le rendement de la pompe. Si la pompe fonctionne en CA, il faut tenir compte du rendement de l'onduleur η_{ond} :

$$\eta_{moy} = \eta_{moto-pompe} \times \eta_{ond} \quad (12)$$

$$E_{moto-pompe} = \frac{E_{hydr}}{\eta_{moy}} \quad (13)$$

Le calcul de puissance à partir du débit journalier que l'on souhaite obtenir, en addition aux caractéristiques de la pompe pouvant satisfaire un certain débit à une certaine hauteur, conduit au choix de la pompe. Ce choix imposera par la suite les caractéristiques U/I de la pompe ; c'est-à-dire le type et la valeur de la tension.

Pour obtenir la même caractéristique U/I du côté du système PV qui satisfasse à cette demande, il faut agencer les panneaux en série et en parallèle, comme cela est schématisé par l'organigramme ci-contre (fig21).

Cela peut conduire à des écarts considérables entre les valeurs de l'agencement PV et celles de la plaque signalétique de la pompe, mais tout est question de compromis et d'ajustement, à condition que la tension du système PV soit dans une fourchette acceptable.

Prenons l'exemple d'une pompe se devant de fonctionner sous une tension moyenne de 100 à 120 Volts continu. Dans ce cas les modules solaires devront être

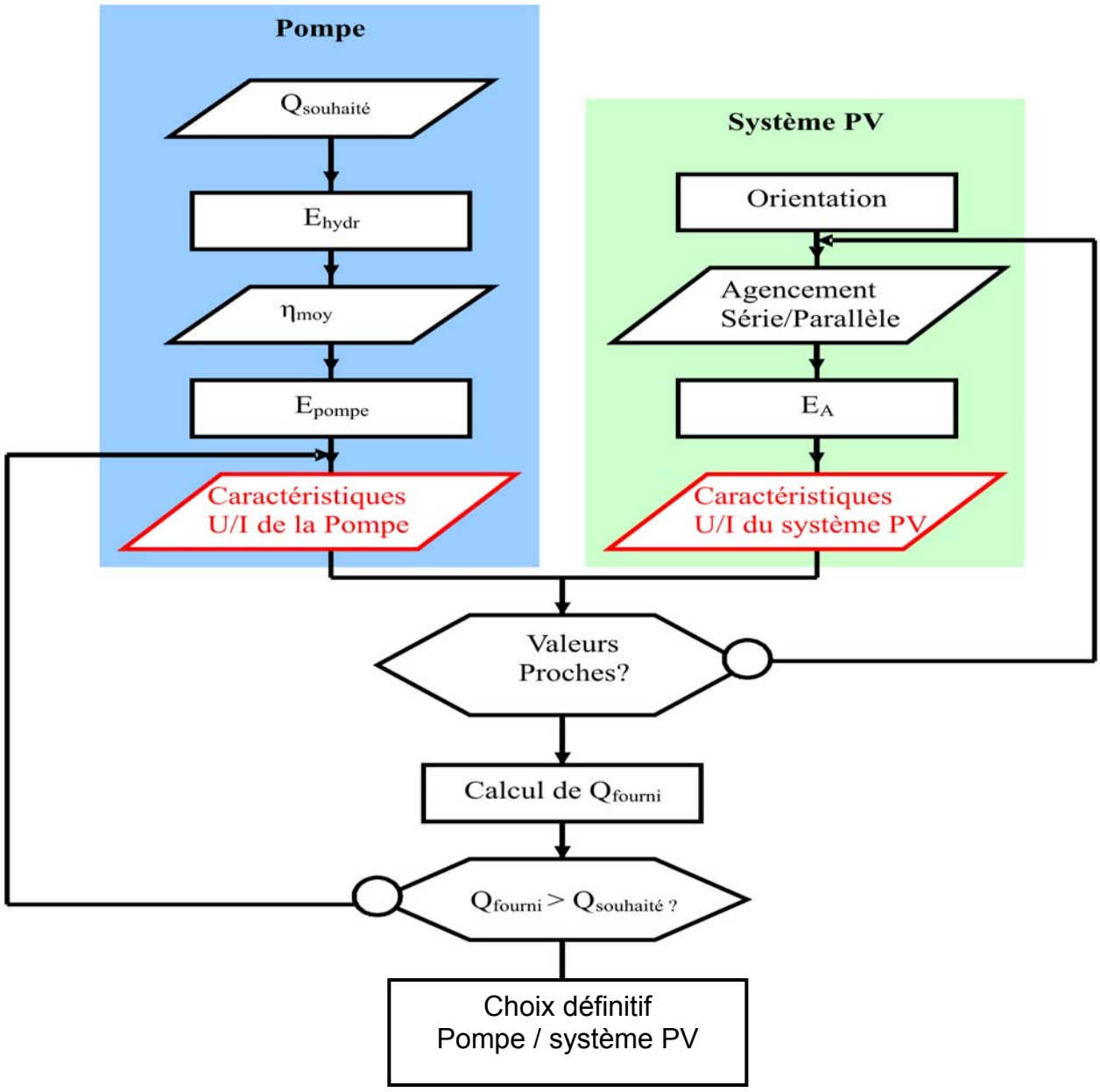


Fig21 : Organigramme de détermination de la pompe et du Système PV

disposés par série de 7 (105V) ou 8 (120V). S'il est nécessaire d'avoir une puissance de modules solaires de 1100 Wc, on voit que : 1100 / 50 = 22. Il faudrait 22 modules solaires! Cependant 22 / 7 ne donne pas une valeur entière! Nous avons donc le choix entre 21 modules (3 x 7) avec un débit inférieur à celui demandé, ou 7 x 4 = 28 modules (1400Wc) ou encore 8 x 3 = 24 modules solaires (1200Wc) solution qui de toute évidence est la meilleure (Débit un peu supérieur à la demande!)

Remarque : D'autres formules peuvent être utilisés, comme par exemple la formule ci-après (cas d'une pompe centrifuge) :

$$P(W) = \frac{10}{IR} \times HMT \times Débit \quad (14)$$

Où P est la puissance théorique en watts du générateur solaire (système PV), 10 un coefficient, IR l'irradiation locale en kWh/m², HMT la hauteur manométrique totale en mètre, et Débit, la quantité d'eau désirée quotidiennement en m^3/jour. Cette formule est fonction de l'irradiation, donc du lieu géographique où est installée la pompe.

Pour les pompes plus puissantes, il est nécessaire de fonctionner sous des tensions établies de 220, 380, voir 660V, généralement triphasée. L'onduleur à découpage alimentant ces pompes est conçu de telle façon qu'il faudra calculer la tension d'entrée (Courant continu) pour obtenir la tension de sortie désirée. Cette tension d'entrée se calcule au moyen de la formule (15) ci-dessus.

$$(Vac)_{\max} = 1.1\frac{Vdc}{\sqrt{2}} \quad (15)$$

Bien entendu, le choix de la motopompe ainsi que l'agencement des panneaux se font à l'aide de la tension continu aux bornes de l'onduleur. Il conviendrait donc de procéder à ce calcul préalable de la tension continue de l'onduleur avant d'effectuer les agencements conduisant au choix des panneaux.

IV– DIMENSIONNEMENT DU CHAMP PHOTOVOLTAÏQUE

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, le dimensionnement proprement dit, c'est-à-dire l'agencement série - parallèle des panneaux solaires se détermine conjointement avec le choix de la pompe pour qu'il y ait compatibilité entre l'offre et la demande d'énergie. En effet, nous avons vu que les caractéristiques Tension et Courant des modules photovoltaïques et de la pompe doivent être en corrélation. Si la corrélation n'est pas respectée, des éléments peuvent se retrouver en panne ! Tout cela est scrupuleusement régulé par l'onduleur s'il y en a besoin (cas d'une pompe fonctionnant en courant alternatif).

IV-1 QUELQUES MOTS SUR L'ONDULEUR

L'onduleur à fréquence variable transforme le courant continu issu des panneaux en courant alternatif monophasé ou triphasé permettant de faire fonctionner la pompe. Cette transformation s'effectue avec un rendement excellent, supérieur à 95%.

La fréquence du courant de sortie (vitesse de la pompe) est variable de façon à adapter la puissance absorbée à celle fournie par les panneaux. De plus, un dispositif géré par microprocesseur permet d'utiliser en permanence les panneaux à leur puissance maximale.

Enfin, l'onduleur est doté d'un ensemble de protections (échauffement, surintensités, baisse de niveau de l'eau dans le forage, ...) ainsi que d'un système d'arrêt lorsque le réservoir est plein. Sa construction robuste et étanche, le choix de composants éprouvés lui confèrent une très grande fiabilité dans les conditions d'utilisation les plus sévères. Ne pas oublier les protections contre la foutre.

IV-2 INCLINAISON DES PANNEAUX

IV-2-1 Position du soleil

L'inclinaison des panneaux est fonction de la latitude du lieu de l'installation. Elle doit être faite de sorte que la direction des rayons venants sur les panneaux soit le plus proche possible de la normale. L'idéal serait que les panneaux suivent la course de soleil, cependant une inclinaison adéquate peut constituer un meilleur compromis : En effet, les pertes liées au fait de l'inclinaison statique n'excèdent pas 10%, si cette inclinaison statique des panneaux est optimisée, d'où l'intérêt de l'étude soigneuse que nécessite cette inclinaison.

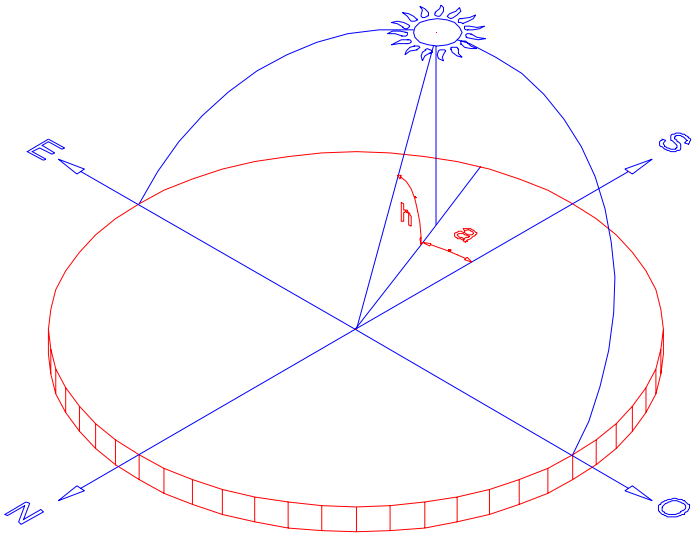


Fig22 : Mouvement du soleil

La position du soleil est définie par 2 paramètres qui sont l'angle de hauteur h (en °) et l'azimut a (en °), comme indiqués sur la figure (fig22).

Le calcul de l'angle de hauteur du soleil s'effectue à l'aide de la formule :

$$\sinh = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos AH \tag{16}$$

Le midi solaire correspond au midi du Méridien qui passe par le pays. Dans le cas du Burkina Faso, le midi solaire correspond au midi horaire, car le Burkina Faso n'a pas de décalage horaire.

La déclinaison solaire varie tout au long de l'année et est extrémale aux solstices. Elle varie de -23,45° le 21 décembre à 23,45° le 21 juin. Elle est déterminée pour tout jour quelconque de l'année par la formule suivante :

$$\delta = 23{,}45 \sin\left(2\pi \frac{284 + n}{365}\right) \tag{17}$$

Avec n = le jour de l'année, c'est-à-dire n = 1 pour le 1er janvier et n = 32 pour le 1er février etc.

Le calcul de l'azimut du soleil s'effectue à l'aide de la formule ci-dessous :

$$\sin a = \frac{\cos\delta \cos AH}{\cosh} \tag{18}$$

Avec ces 2 formules, nous pouvons déterminer de manière précise à toute date et heure de l'année, quelle sera la position du soleil, et ceci en tout point du globe terrestre (Exception faite des régions polaires). On peut également déterminer les heures précises de levée et de couché du soleil, connaissant ainsi la durée totale d'insolation (exposition au soleil).

IV-2-2 Orientation des panneaux par rapport au soleil

L'orientation des panneaux est également définie par 2 angles i (en °) = 0° pour le plan horizontal et γ (en °) = 0° pour un plan orienté au Sud (pour les pays de l'hémisphère Nord et vice versa) comme indiqué sur la figure ci-contre (fig26). γ peut être remplacée par une direction géographique : NW (Nord Ouest) ou SE (Sud Est) par exemple. Ce sont les angles sur lesquels nous devrions jouer si nous voulions que les surfaces des panneaux suivent la course du soleil. Ainsi, le plan orienté des panneaux peut être défini par le couple de données (i, γ).

Une orientation optimale impose un angle i = Φ + δ avec -23,45°< δ <+23,45°. Une orientation fixe « à l'année » des panneaux pour un site dans un pays sahélien serait par conséquent (Φ,0) comme indiqué sur la figure de la page suivante (fig23) :

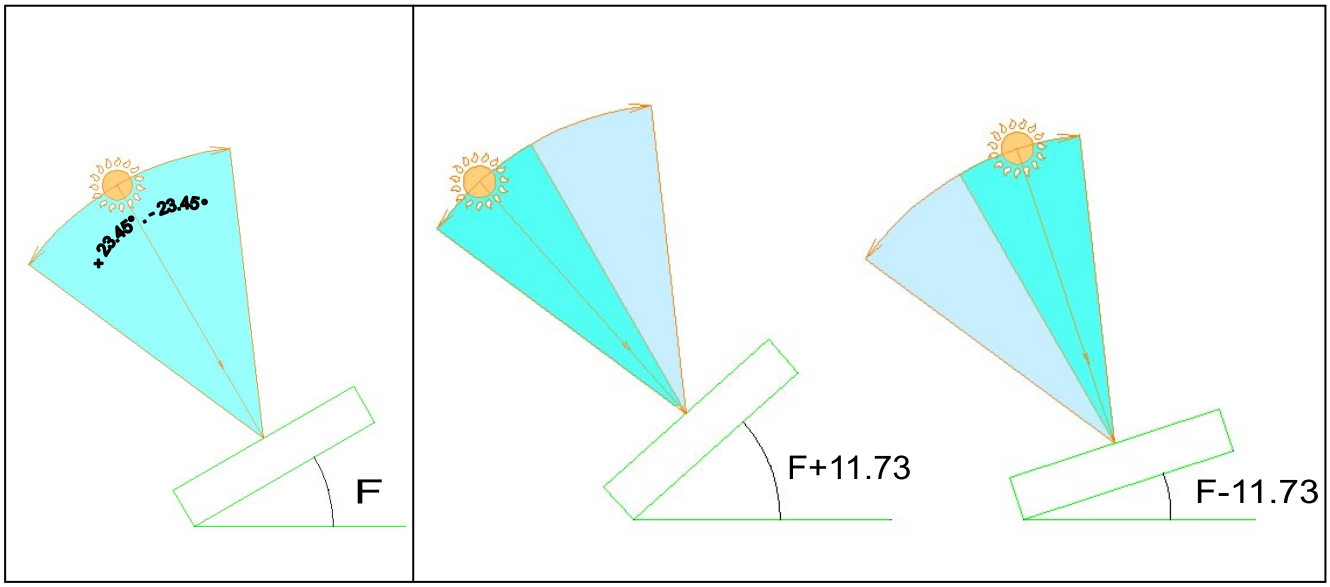


Fig23 : Orientation fixe **Fig24 : Orientations semi - fixes**

On peut optimiser cette orientation en prévoyant 2 positions sur les panneaux : les panneaux seraient réglés par un agent de maintenance qui les positionnerait chaque semestre pendant les équinoxes, comme indiqué sur la figure ci-dessus (fig24). Dans ce cas, nous aurons pour les deux positions : (Φ+11,73 ; 0) positionné le 23 septembre et (Φ-11,73 ; 0) positionné le 21 mars.

Nous pouvons considérer ces positionnements comme étant des orientations semi – fixes des panneaux : en effet, l'angle i est variable tandis que l'angle γ est toujours nul.

IV-3 CALCUL DE L'ENSOLEILLEMENT DANS LE PLAN DU CHAMP PV

IV-3-1 Angle d'incidence du rayonnement sur les panneaux

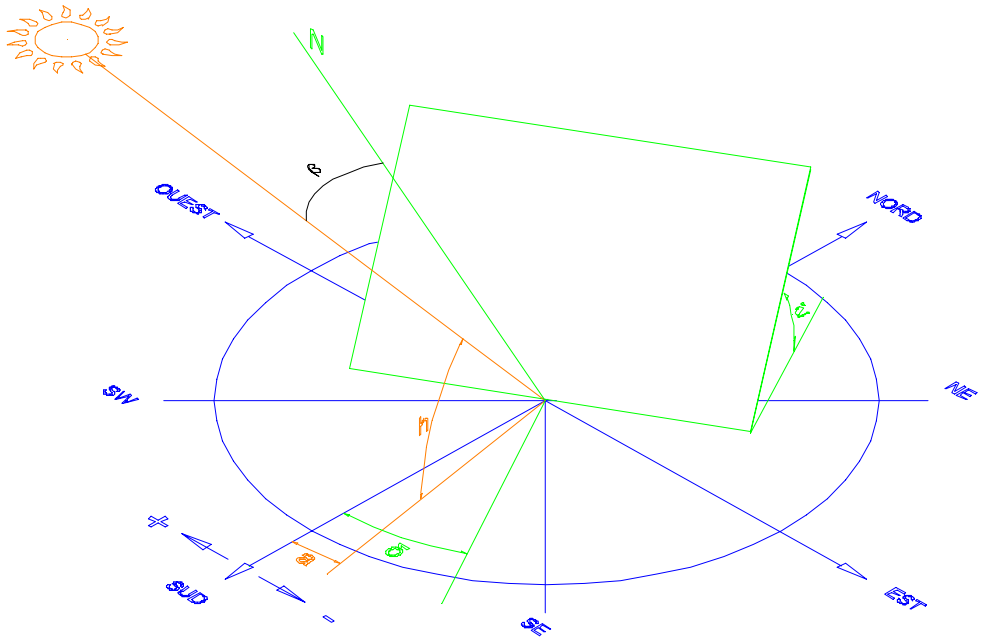


Fig25 : Positionnement du panneau par rapport au soleil

L'angle d'incidence β (en °) est l'angle formé par le rayon solaire incident et la normale au plan récepteur comme indiqué sur la figure ci-dessus (fig25). Cet angle permet de déterminer la composante utile du rayonnement solaire direct : Le calcul de l'angle d'incidence β sur une surface (i ; γ) de panneaux peut être effectué à l'aide de la formule trigonométrique générale suivante :

$$\cos\beta = \left|\cosh \times \sin i \times \cos(a-\gamma) + \sinh \times \cos i\right| \quad (19)$$

Dans le cas des l'orientations fixes et semi - fixes ci-dessus :

a) i = Φ et γ = 0 :

$$\cos\beta = \left|\cosh \times \sin\phi \times \cos(a) + \sinh \times \cos\phi\right| \quad (20)$$

b) (Φ-11,73 ; 0) et (Φ+11,73 ; 0) :

$$\cos\beta = \left|\cosh \times \sin(\phi - 11.73) \times \cos(a) + \sinh \times \cos(\phi - 11.73)\right| \quad (21)$$

dès le 21 mars et :

$$\cos\beta = \left|\cosh \times \sin(\phi + 11.73) \times \cos(a) + \sinh \times \cos(\phi + 11.73)\right| \quad (22)$$

dès le 23 septembre.

IV-3-2 Ensoleillement dans le plan du champ PV

L'ensoleillement journalier H_t peut être calculé de deux manières :

a) - Par la méthode des sommes d'ensoleillement horaires :

Cette méthode consiste à calculer un ensoleillement horaire pour chaque heure de la journée, et à faire la sommation de ces ensoleillements horaires.

b) – Par la méthode de la valeur crête d'ensoleillement à midi.

Cette méthode fait l'hypothèse que la courbe d'ensoleillement journalier (voir figure(22)) peut être approchée par une sinusoïde. L'ensoleillement journalier peut donc être calculé connaissant l'ensoleillement maximal à midi solaire.

Ces valeurs peuvent par la suite être exploitées par la formule globale de Duffie et Beckman (1991) suivante, cette formule s'appliquant aux orientations fixes et semi - fixes :

Dans le premier cas :

$$H_t = H_b \times R_b + H_d \times \left(\frac{1+\cos i}{2}\right) + H \times alb \times \left(\frac{1-\cos i}{2}\right) \quad (23)$$

$$H = H_b + H_d \quad (24)$$

$$R_b = \frac{\cos \beta}{\cosh} \quad (25)$$

$$\overline{H_t} = \sum H_t \quad (26)$$

Dans le second cas :

$$H_{\max} = H_b \times R_b + H_d \times \left(\frac{1+\cos i}{2}\right) + H \times alb \times \left(\frac{1-\cos i}{2}\right) \quad (27)$$

$$H = H_c + H_d \quad (28)$$

$$\overline{H_t} = \frac{2 \times H_{\max}}{\pi} \times \Delta t \quad (29)$$

IV-4 MODELISATION DU CHAMP PHOTOVOLTAÏQUE

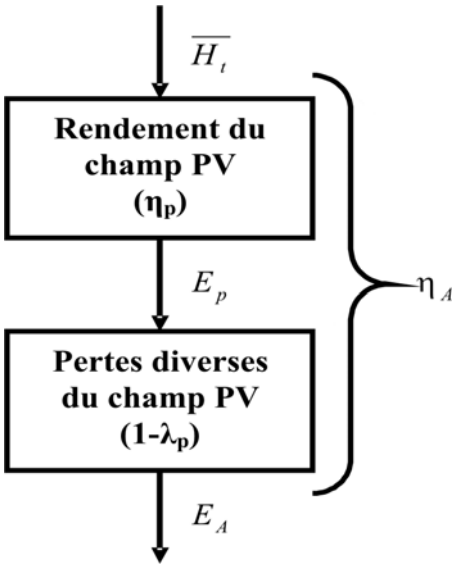


Fig26 : Organigramme du Champ PV

Le champ photovoltaïque peut être modélisé par l'organigramme ci-contre (fig26). L'énergie produite par le champ photovoltaïque E_p est donnée par :

$$E_p = S \times \eta_P \times \overline{H_t} \tag{30}$$

Avec S = surface du champ photovoltaïque

Le rendement moyen η_p du champ photovoltaïque est fonction de la température moyenne T_c du module ; avec T_c reliée à la température ambiante moyenne du mois T_a par la formule d'Evans (1981):

$$\eta_p = \eta_r \times \left[1 - \beta_p \times (T_c - T_r)\right] \tag{31}$$

$$T_c - T_a = (219 + 832\overline{K_t}) \frac{NOCT - 20}{800} \times C_f \tag{32}$$

Les valeurs η_r, βp et NOCT indiquées ci-dessus dépendent du type de module à considérer. Nous pouvons néanmoins nous fier aux valeurs données par défaut si elles ne sont pas spécifiées par le constructeur. (Tableau3)

Tableau3 : Caractéristiques du module PV pour des technologies courantes

Type du module	η_r (%)	NOCT (°C)	β_p (%/°C)
Si mono-cristallin	13,0	45	0,40
Si poly-cristallin	11,0	45	0,40
Si amorphe	5,0	50	0,11
CdTe	7,0	46	0,24
$CuInSe_2$ (CIS)	7,5	47	0,46

C_f : Coefficient de correction. Si l'inclinaison des panneaux = latitude Φ plus la déclinaison solaire δ, elle est optimale, et C_f = 1 ; sinon :

$$C_f = 1 - 1.17 \times 10^{-4} \times (s_M - s)^2 \tag{33}$$

Les pertes diverses dans le système PV λ_p sont également prises en compte. Ce pourrait être éventuellement les pertes liées à l'agencement U/I.

$$E_A = E_p \times (1 - \lambda_p) \tag{34}$$

Et alors le rendement total du système η_A :

$$\eta_A = \frac{E_A}{S \times \overline{H_t}} \tag{35}$$

Avec de telles formules, nous nous rendons compte que la dimension (surface S) du champ PV sera fonction de l'énergie qu'il doit produire et de l'ensoleillement du site.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cette étude, nous avons analysé les éléments constitutifs d'un système de pompage PV pour une irrigation goutte à goutte. Cette analyse a permis de dégager des critères optimums pour le choix et le dimensionnement de ces éléments. Des indications ont été données pour une installation dans les régions sahéliennes.

Cette étude a montré que le choix et dimensionnement des éléments d'un système photovoltaïque pour une irrigation goutte à goutte procède d'une estimation des besoins en eau. Cette estimation peut être préalablement calculée, mais en définitive, elle sera approchée du fait que l'on souhaite obtenir une autonomie en cas de mauvais temps. Cette approche conduit ainsi au dimensionnement approximatif de la capacité de stockage de l'eau.

Les éléments conditionnant le choix d'une moto - pompe dépendent de plusieurs facteurs importants : le type de pompe voulu, le type et la caractéristique U/I du moteur, la puissance nécessaire pour le pompage, la hauteur manométrique totale de l'installation, etc. Ce choix nécessite la connaissance de la profondeur de la source d'eau.

Une optimisation du choix et de dimensionnement suppose un inventaire étendu de toutes les caractéristiques des moto-pompes commercialisées sur le marché.

L'analyse est à peu près identique pour le choix et le dimensionnement des panneaux solaires : leurs caractéristiques constructeurs de tension et puissance étant variables d'un modèle à un autre, un inventaire des panneaux commercialisés s'impose. De cette manière, les caractéristiques U/I des panneaux et celles des moto-pompes peuvent être comparées aisément pour une optimisation du choix et de l'agencement des panneaux.

Finalement, le positionnement des panneaux solaires ainsi que la détermination de la surface nécessaire pour le bon fonctionnement de la pompe peuvent être calculés. Ceux-ci nécessitent quelques connaissances des paramètres géographiques du site ainsi que de son ensoleillement.

Cette étude a également montré la nécessité de disposer d'informations météorologiques précises historiques et actuelles, tant pour le calcul des besoins en eau du champ à irriguer que pour le calcul et le dimensionnement des panneaux. Dans le cas contraire, l'implantation d'un évaporimètre d'appoint ou d'une mini centrale météo doit être envisagée.

Dans le cadre d'un projet d'irrigation, des informations sur la composition et la nature des sols, les besoins en eau de chaque culture et la profondeur des nappes phréatiques doivent être également disponibles.

Des logiciels de dimensionnement sont déjà proposés par les fabricants de pompes solaires et de panneaux PV, mais les écarts de résultats trahissent le manque d'optimisation. Mr J. C. Scholle a proposé une comparaison de quelques-uns de ces logiciels. Les perspectives doivent évidement conduire à l'élaboration d'un logiciel de dimensionnement plus optimisé, car s'appuyant sur une base de données des moto-pompes et des panneaux solaires, ainsi que sur des données météorologiques ou des relevés sur site fiables. Enfin, une optimisation financière peut également être envisagée.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Fondation Energie pour le monde et Peuples Solidaires, « **ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE** ». Paris - 2005-06

[2] C. Daux et C. Lusseau - Sciences de l'Ingénieur – EduSCOL/ENS, « **ARCHITECTURE DE LA CHAINE D'ENERGIE DE POMPAGE DE L'EAU BRUTE** ». – Cachan – 01 janvier 2004

[3] J. C. Scholle, « **LE DIMENSIONNEMENT D'INSTALLATION SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE : Identification, évaluation et comparaison de quelques outils de dimensionnement** ». Pau – 4 mai – 2006

[4] - ENERGIES NOUVELLES ENTREPRISES –, « **LES POMPES SOLAIRES** ». Conférence GRDR ; St Mamert - 2002

[5] RETScreen International – Ministère des Ressources naturelles, « **ANALYSE DE PROJETS D'INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE** ». – Canada - 2001-2004

[6] Hassan ELATTIR, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, - « **LA CONDUITE ET LE PILOTAGE DE L'IRRIGATION GOUTTE A GOUTTE EN MARAICHAGE** ». Mensuel MADRPM/DERD N°124 - Rabat , Janvier 2005.

[7] Agriculture et Agroalimentaire du Canada – ARAP, - « **LES SYSTEMES DE POMPAGE A ENERGIE SOLAIRE POUR L'ABREUVEMENT DU BETAIL** », 01 décembre 2006

[8] CIP-CSP, « **LE POMPAGE AU FIL DU SOLEIL : Constitution d'un système de pompage photovoltaïque** »

[9] A. Ibrahima, A. Schmitt, A. Guillerminet, EIER Ouaga , A Mermoud, EPFL –Lausane , « **BILANS HYDRIQUES SUR SOLS LATERITIQUES DU PLATEAU MOSSI : Etude comparée d'un sol sous culture non labouré et labouré à billons cloisonnés** » Ed. AUPELF-UREF – John Libbey Eurotext. Paris 1991

[10] Ludovic Oudin , « **RECHERCHE D'UN MODELE D'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIEL PERTINENT COMME ENTREE D'UN MODELE PLUIE - DEBIT GLOBAL** » – Thèse de Doctorat de l'ENGREF (Paris) - 29 octobre 2006.

[11] S. Bouhlassa et S. Paré – Fac MoahmedV , « **EVAPOTRANSPIRATION DE REFERENCE DANSLA REGION ARIDE DE TAFILALET AU SUD-EST DU MAROC** ». Ed. AJEAM-RAGEE Vol. 11, Avril 2006.

[12] Netherlands Water Partnership – 3e Forum de Tokyo, "**L'EAU: DES SOLUTIONS SIMPLES ET ECONOMIQUES** ». Tokyo - Mars 2003

[13] Théodore FOGELMAN. « **SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES POUR LES PAYS EN DEVELOPPEMENT : Manuel d'installation et d'utilisation** » Agence Française pour la Maitrise de l'Energie (AFME) – septembre 1982

[14] Zacharie KOALAGA, « **ELECTRICITE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE** » Université de Ouagadougou et EIER, fpu/gefi 1999-2000

[15] ROYER, J., DJIAKO, T., SCHILLER, E. et SY, B. S .,« **LE POMPAGE PHOTOVOLTAIQUE : Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens** » Institut de l'Energie des Pays ayant en commun l'usage du Français, Québec - 1998.